

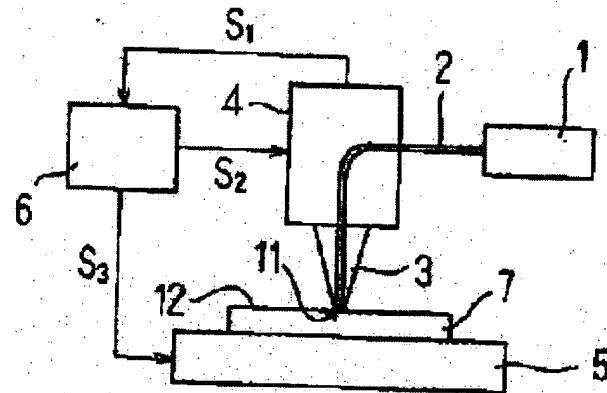
LASER MACHINING APPARATUS AND IT'S METHOD, AND OPTICAL ELEMENT MACHINED BY USING THE SAME

Patent number: JP2001239390
Publication date: 2001-09-04
Inventor: TOKUMURA KEIU; OOWARI HIROSHI; JITSUNO TAKAHISA
Applicant: NIPPON HIKYUMEN LENS KK.; JITSUNO TAKAHISA
Classification:
 - **international:** B23K26/08; B23K26/00; B81B7/02; G01N13/10;
 G01N13/16; G02B21/00; G03H1/04
 - **european:**
Application number: JP20000051975 20000228
Priority number(s):

Abstract of JP2001239390

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a laser machining apparatus which is able to perform micro-fabrication under sub-micron to a physical object, corresponding to the increase of memory capacity of an optical disc, in manufacturing diffraction grating of a hologram element used for a DVD device and the like.

SOLUTION: The short wavelength ultraviolet radiation laser is induced to an optical fiber 2, the tip of which is derived to the top of a probe 3 of AFM(atomic force microscope) 4. An optical transmission part 11 is formed by acuminating the tip of prescribed optical fiber 2 to bore a micro hole having the dimension less than the wavelength of prescribed ultraviolet laser. The contact place light of prescribed ultraviolet laser, generating at the other end of the optical transmission part 11, gives micro-fabrication to the surface 12 of a processing substrate 7 which is located in the area of the contact place light. Furthermore, the probe 3 of AFM 4, measuring processed dimensions on the surface 12, monitors the processing condition by the contact place light.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(51) Int.Cl.⁷
B 23 K 26/08

26/00

B 81 B 7/02

識別記号

F I
B 23 K 26/08
26/00

審査請求 未請求 請求項の数 8 OL (全 6 頁) 最終頁に統く

マーク(参考)
K 2H052
D 2K008
G 4E068
P

(21)出願番号 特願2000-51975(P2000-51975)

(22)出願日 平成12年2月28日(2000.2.28)

(71)出願人 591225327
日本非球面レンズ株式会社
大阪府三島郡島本町山崎2丁目1番7号

(71)出願人 594061724

實野 孝久
大阪府吹田市山田丘2-6 大阪大学レーザー核融合研究センター内

(72)発明者 徳村 啓雨

大阪府三島郡島本町山崎2丁目1番7号
日本非球面レンズ株式会社内

(74)代理人 100064584

弁理士 江原 省吾 (外3名)

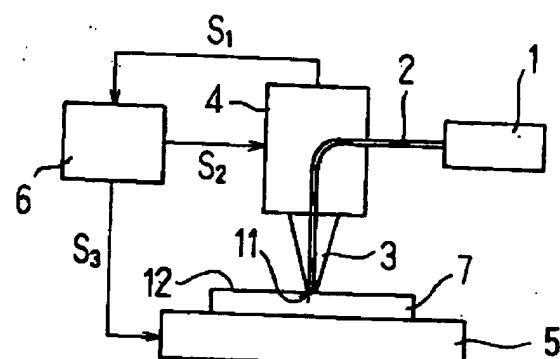
最終頁に統く

(54)【発明の名称】 レーザ加工装置及び方法とこれを用いて加工された光学素子

(57)【要約】

【課題】 DVD装置などに使用されるホログラム素子の回折格子を製作する上で、光ディスクの記憶容量の増大に対応して加工対象物をサブミクロン以下で容易に微細加工し得るレーザ加工装置を提供することにある。

【解決手段】 レーザ発振器1により生成された短波長の紫外線レーザを光ファイバ2に導入してその光ファイバ2の先端をAFM4(原子間力顕微鏡)のプローブ3先端に導出し、前記光ファイバ2の先端を尖鋭化して前記紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部11を形成したことによりその光透過部11の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工基板7の表面12を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工すると共に、前記表面12での加工寸法をAFM4のプローブ3で測定して近接場光による加工状態をモニタリングする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 短波長の紫外線レーザを伝送する光伝送路の先端を尖鋭化して前記紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を形成したことによりその光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工することを特徴とするレーザ加工方法。

【請求項2】 短波長の紫外線レーザを伝送する光伝送路の先端をAFM(原子間力顕微鏡)のプローブ先端に導出し、前記光伝送路の先端を尖鋭化して前記紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を形成したことによりその光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工すると共に、前記被加工面での加工寸法をAFMのプローブで測定して近接場光による加工状態をモニタリングすることを特徴とするレーザ加工方法。

【請求項3】 前記加工対象物の被加工面が三次元面であることを特徴とする請求項1又は2に記載のレーザ加工方法。

【請求項4】 短波長の紫外線レーザを生成するレーザ発振器と、そのレーザ発振器から出力された短波長の紫外線レーザを伝送し、その紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を先端の尖鋭化により形成した光伝送路とを備え、前記光伝送路先端の光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工することを特徴とするレーザ加工装置。

【請求項5】 短波長の紫外線レーザを生成するレーザ発振器と、そのレーザ発振器から出力された短波長の紫外線レーザを伝送し、その紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を先端の尖鋭化により形成した光伝送路と、その光伝送路の先端が導出されたプローブを有するAFM(原子間力顕微鏡)とを備え、前記光伝送路先端の光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工すると共に、前記被加工面での加工寸法をAFMのプローブで測定して近接場光による加工状態をモニタリングすることを特徴とするレーザ加工装置。

【請求項6】 前記紫外線レーザの近接場光を加工対象物の被加工面に対して走査し得るように前記加工対象物が位置決め載置された少なくともXYテーブルを具備したことを特徴とする請求項4又は5に記載のレーザ加工装置。

【請求項7】 前記加工対象物の被加工面が三次元面であることを特徴とする請求項4乃至6のいずれかに記載のレーザ加工装置。

【請求項8】 請求項1乃至7のいずれかに記載のレー

ザ加工装置又は方法により製作され、サブミクロン以下の微細加工パターンを有することを特徴とする光学素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明はレーザ加工装置及び方法とこれを用いて加工された光学素子に関し、例えば、DVD装置においてトラッキングエラー検出に回折格子を用いたホログラム素子やフレネルレンズなどのバイナリオプティクスを含む各種の光学素子を製作するためのレーザ加工装置及び方法などに関する。

【0002】

【従来の技術】近年、DVD装置に使用される光ディスクの記憶容量が増大する傾向にあり、その光ディスクの情報の読み書きを実行する光ピックアップの分解能を向上させている。一方、この光ディスクに対する光ピックアップのトラッキングエラー検出に回折格子を用いたホログラム素子が使用されているが、光ディスクの記憶容量の増大に伴い、ホログラム素子における回折格子の凹凸ピッチを狭くする必要がある。このホログラム素子の回折格子を製作するためには、リソグラフィ技術を利用してその表面形状を加工する一般的な手法が採用され、そのリソグラフィ技術により加工基板の表面に周期的な凹凸構造を形成するようになっていた。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、ホログラム素子の回折格子を製作するため、加工基板の表面に周期的な凹凸構造を形成する一般的な手法として採用されていたリソグラフィ技術による表面加工では、ホログラム素子の回折格子を製作する上で量産性に乏しく、また、短波長の光源を使用しても、例えば200μm以下のサブミクロン領域での微細加工が困難であるというのが現状であった。

【0004】そこで、本発明の目的とするところは、DVD装置などに使用されるホログラム素子の回折格子を製作する上で、量産性の向上が図れ、光ディスクの記憶容量の増大に対応して加工対象物をサブミクロン以下の領域で容易に微細加工し得るレーザ加工装置及び方法などを提供することにある。

【0005】

【課題を解決するための手段】前記目的を達成するための技術的手段として、本発明方法は、短波長の紫外線レーザを伝送する光伝送路の先端を尖鋭化して前記紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を形成したことによりその光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工することを特徴とし(請求項1)、本発明装置は、短波長の紫外線レーザを生成するレーザ発振器と、そのレーザ発振器から出力された短波長の紫外線レーザを伝送し、その紫外

線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を先端の尖鋭化により形成した光伝送路とを備え、前記光伝送路先端の光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工することを特徴とする（請求項4）。

【0006】本発明では、短波長の紫外線レーザを透過させた光伝送路の先端を尖鋭化して前記紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を形成したことによりその光透過部の先方に近接場光を発生させる。この近接場光のパワーは小さいが、単位面積当たりのパワー密度が高く、光伝送路の先端の光透過部が紫外線レーザの波長より小さいことから、近接場光を加工対象物の被加工面に照射すれば、その紫外線レーザの近接場光により被加工面をサブミクロン以下で微細加工することができる。

【0007】また、本発明方法は、短波長の紫外線レーザを伝送する光伝送路の先端をAFM（原子間力顕微鏡）のプローブ先端に導出し、前記光伝送路の先端を尖鋭化して前記紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を形成したことによりその光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工すると共に、前記被加工面での加工寸法をAFMのプローブで測定して近接場光による加工状態をモニタリングすることを特徴とし（請求項2）、本発明装置は、短波長の紫外線レーザを生成するレーザ発振器と、そのレーザ発振器から出力された短波長の紫外線レーザを伝送し、その紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を先端の尖鋭化により形成した光伝送路と、その光伝送路の先端が導出されたプローブを有するAFM（原子間力顕微鏡）とを備え、前記光伝送路先端の光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工すると共に、前記被加工面での加工寸法をAFMのプローブで測定して近接場光による加工状態をモニタリングすることを特徴とする（請求項5）。

【0008】この近接場光による紫外線レーザの微細加工に際しては、前記紫外線レーザの近接場光により得られた被加工面での加工寸法をAFMのプローブで測定して近接場光による加工状態をモニタリングすることが望ましい。つまり、AFMのプローブにより得られた加工前と加工後の出力差から加工寸法を割り出すことができ、それに基づいて加工状態をモニタリングしながら、最適な微細加工を実現容易にする。

【0009】なお、前述した本発明装置では、前記紫外線レーザの近接場光を加工対象物の被加工面に対して走査し得るように前記加工対象物が位置決め裁置された少なくともXYテーブルを具備することが望ましい（請求

項6）。また、本発明は、三次元構造物などの被加工面、例えば球面などの三次元面を有する加工対象物にも適用可能である（請求項3、7）。本発明に係るレーザ加工装置又は方法により製作され、サブミクロン以下の微細加工バターンを有する光学素子を得ることができる（請求項8）。

【0010】

【発明の実施の形態】本発明の実施形態を以下に詳述する。以下の実施形態では、DVD装置に使用される光ディスクに対する光ピックアップのトラッキングエラー検出に回折格子を用いたホログラム素子を製作するに際して、加工対象物である加工基板の表面にレーザ加工により周期的な凹凸構造を形成して回折格子を製作する場合について説明する。なお、本発明は、三次元構造物などの被加工面、例えば球面などの三次元面を有する加工対象物にも適用可能である。その場合、必要であれば、後述するXYテーブルに加えて、Z方向に加工対象物を移動させるZテーブルを付設するか、あるいは、AFMのプローブを昇降させる装置を付設すればよい。

【0011】図1はレーザ加工装置の概略構成を示し、図2は図1の概略構成のうちでAFMのプローブの具体的構造の一例を示す。同図に示す実施形態のレーザ加工装置は、短波長の紫外線レーザを生成するレーザ発振器1と、そのレーザ発振器1の出力に光学的に接続された光伝送路である光ファイバ2（例えばガラスファイバ）を導入し、その光ファイバ2の先端をプローブ3に導出したAFM4（AtomicForce Microscopy：原子間力顕微鏡）と、AFM4のプローブ位置検出手段からの検出信号S₁に基づいてプローブ3の駆動手段にプローブ制御信号S₂を出し、また、プローブ3のXY座標データに基づいてXYテーブル5の駆動手段にテーブル制御信号S₃を出力する制御器6とを具備する。

【0012】この加工基板7は、樹脂または金属製などのもので、例えば金属製基板を加工対象物とした場合にはエッティングガスを導入することも可能である。また、この加工基板7は、レーザ加工によりサブミクロン以下の微細加工バターンを有する回折格子自体となるもの以外に、その回折格子を製作するための金型であってもよく、金型の場合には、その金型によりサブミクロン以下の微細加工バターンを有する回折格子を量産することができる。加工基板7は、その表面12（被加工面）がAFM4のプローブ3の先端に近接するように対向配置される。

【0013】この加工基板7は、例えばXYテーブル5上に位置決め裁置され、そのXYテーブル5は、制御器6からのテーブル制御信号S₃に基づいて駆動手段のピエゾ素子（圧電素子）によりX方向及びY方向に駆動されることにより、前記加工基板7がXY方向に微小移動可能な状態（例えば100μm程度）となっている。また、この加工基板7をさらにXY方向に移動させるため

には、前記XYテーブル5を別のXYテーブル（図示せず）上に載置した構造とすれば、その加工基板7をミクロンオーダーでXY方向に移動可能とすることができる。

【0014】前記レーザ発振器1は、短波長の紫外線レーザ、例えば110～266nmの短波長を有する紫外線レーザを光源とするもので、その紫外線レーザとしては、例えば193nmの短波長のArFからなるエキシマレーザや、158nmの短波長のフッ素レーザ、210～266nmのYAGレーザ（高調波光）等が好適であり、その他水素レーザ等が使用可能である。

【0015】前記レーザ発振器1から延びる光ファイバ2は、図3に示すように屈折率が異なる二部材、すなわち、中心部に位置するコア8とそのコア8の周囲に位置するクラッド9からなり、その先端を前記プローブ3の先端に導出した構造を具備する（図1及び図2参照）。この光ファイバ2の先端は尖鋭化され、例えばクラッド9端面から突出したコア8の先端を円錐状に尖らせた形状を有し、そのクラッド9端面に金属膜10を蒸着などにより被着させることにより、円錐状のコア8に前記紫外線レーザの波長（例えば193nm）よりも小さい光透過部11（例えば100nm以下）を形成する。

【0016】このように光ファイバ2の先端を尖鋭化して微小開口させた光透過部11が紫外線レーザの波長よりも小さいことからその光透過部11の先方に近接場光A（エバネッセント光）が発生する。この近接場光Aの領域は、前記光透過部11の大きさに比例した大きさとなり、この大きさがレーザ加工時の最小加工幅となる。

【0017】なお、光ファイバ2の先端に近接場光Aを発生させるためには、この実施形態では、コア8の先端を円錐状に尖らせた形状とした光透過部11を形成しているが、この形態に限定されることなく、光ファイバ2の先端を尖鋭化して紫外線レーザの波長以下で微小開口する形態であればよい。

【0018】一方、AFM4は、加工基板7の表面12とプローブ3の先端との間に働く力（原子間力）により生じるプローブ3の変位をナノオーダーで検出可能な装置であり、微弱な力により撓みやすいカンチレバー13（片持ち梁）の先端にプローブ3が形成され、そのプローブ3の変位を測定するプローブ位置検出手段の光学系を有する（図2参照）。この光学系は、例えば前記カンチレバー13の背面に設けられた反射ミラー14に対して検出用光源15及び光検出器16を所定位置に固定配置し、検出用光源15からの照射光を反射ミラー14で反射させ、その反射光を光検出器16により検出し、この検出信号S₁が制御器6に送出される。

【0019】また、このカンチレバー13の支持部近傍にはプローブ駆動手段のピエゾ素子17（圧電素子）が配設されており、制御器6からのプローブ制御信号S₂に基づいてピエゾ素子17を駆動することによりカンチ

レバー13が撓むことになり、その撓みによりカンチレバー13先端のプローブ3を加工基板7の表面に対して近接離間させる。前記ピエゾ素子17に印加される電圧を上昇させれば、プローブ3が加工基板7の表面に近接し、逆に、ピエゾ素子17への印加電圧を低下させれば、プローブ3が加工基板7の表面から離間することになる。

【0020】このAFM4では、ピエゾ素子17の印加電圧の増減によりカンチレバー13先端のプローブ3を加工基板7の表面に近接または離間させながら、プローブ3先端の原子と加工基板7表面の原子との間に作用する微小な力（原子間力）の変化をカンチレバー13の変位（撓み角）として検出する。つまり、前記原子間力の変化を、検出用光源15からプローブ3背面の反射ミラー14に当たられた光（レーザ光）の反射角の変化として光検出器16によって検出する。

【0021】この検出信号S₁に基づいて制御器6では、プローブ3の先端と加工基板7の表面間の距離（例えば数nm）を一定に保つように、ピエゾ素子17の印加電圧を制御してプローブ3の先端と加工基板7の表面との間隔を調整する。従って、加工基板7の表面に凹凸がある場合、その加工基板7の表面上でプローブ3を走査すれば、プローブ3の先端を加工基板7の表面からの距離が一定となるように凹凸形状に追従させて位置調整することができる。

【0022】この実施形態のレーザ加工装置の制御は以下の要領で実行される。まず、前述したようにAFM4のカンチレバー13の先端に位置するプローブ3を原子間力により、そのプローブ3の先端と加工基板7の表面間の距離（例えば数nm）を一定に保つように位置決め配置する。

【0023】一方、レーザ発振器1から出力された短波長の紫外線レーザを光ファイバ2を介してAFM4に導入してそのプローブ3の先端に配置された光ファイバ2の先端に形成された光透過部11に導出する。この光透過部11は、前述したように紫外線レーザが透過する円錐状コア8として形成され、その紫外線レーザの波長よりも小さいことから、その円錐状コア8の先方に近接場光Aが発生する。

【0024】例えば、紫外線レーザとして193nmの短波長のArFからなるエキシマレーザを使用した場合、円錐状コア8をなす光透過部11では紫外線レーザの波長よりも小さい、例えば100nm以下の微小開口であることから、その紫外線レーザによる近接場光Aにより加工基板7の表面を200μm以下のサブミクロン領域、例えばナノオーダーで微細加工することができ、例えば100nm以下の大きさを有する凹部18を形成することができる（図4参照）。この凹部18の大きさ、つまり、凹部18の加工幅は近接場光Aの大きさにより決定される。

【0025】以上のようにして加工基板7の表面に紫外線レーザによる近接場光Aで凹部18を形成すると、プローブ3の先端と加工基板7の表面、つまり、凹部18の底部との距離が大きくなるので、プローブ3の先端と凹部18の底部間の距離(例えば数nm)が一定となる位置まで、ピエゾ素子17への通電(印加電圧の上昇)によりカンチレバー13を撓ませてプローブ3を近接させる。

【0026】そして、プローブ3の先端と凹部18の底部間の距離が一定となる位置までプローブ3が近接すれば、その位置(加工後)での光学系における反射光と初期位置(加工前)での反射光との位相ずれに基づいて制御器6では、凹部18の加工深さを演算処理により求め。このようにして凹部18の加工深さをAFM4のプローブ3の移動量で測定することにより、その加工量を制御してAFM4でモニタリングすることにより最適な加工深さを有する凹部18を微細加工することができる。

【0027】前述のようにして凹部18を微細加工する際には、XYテーブル5のピエゾ素子(図示せず)への通電によりXYテーブル5を介して加工基板7をXY方向の任意方向に微小移動させれば、加工基板7に対してプローブ3先端に位置する紫外線レーザの近接場光Aを走査することができ、所望の形状及び長さを有する凹溝を形成することができ、最終的に、加工基板7の表面に周期的な凹凸構造を微細加工することができる。このような加工基板7を200μm以下のサブミクロン領域で微細加工することにより回折格子を製作できる。

【0028】このように回折格子を前述したようなサブミクロン領域で製作することができると、その回折格子について、反射防止効果、偏向子(波長板)、狭帯域バンドパスフィルタ等としての機能を発揮させることができる。

【0029】なお、前述した紫外線レーザの近接場光Aによる微細加工では、凹部18を形成する場合について説明したが、例えばCVD技術を用いて金属族原子を含むガスを導入し、紫外線レーザの近接場光により金属を加工基板の表面に堆積させて凸部を形成することも可能である。この場合も、その凸部の最小加工幅は、近接場光の大きさに依存し、凸部の高さはAFMのプローブでモニタリングすることにより最適制御することが可能である。

【0030】また、前記実施形態では、DVD装置を使用される光ディスクに対する光ピックアップのトラッキングエラー検出に回折格子を用いたホログラム素子を製作する場合について説明したが、本発明はこれに限定されることなく、他の光学素子や、半導体素子の集積度を向上させることを目的として、CVD装置における回路パターン形成のために加工基板をレーザ加工する場合に

も適用可能である。

【0031】

【発明の効果】本発明によれば、レーザ発振器により生成された短波長の紫外線レーザを光伝送路に導入し、その前記光伝送路の先端を尖鋭化して前記紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を形成したことにより、その光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工することにより、

10 加工対象物の被加工面を200μm以下のサブミクロン領域で微細加工が可能となり、例えばDVD装置等の光記録媒体における記憶容量の増大や、CVD等による半導体技術における集積度の向上についても容易に対応することができる。また、DVD装置などに使用される回折格子については、前記サブミクロン以下の微細加工が可能になれば、反射防止効果、偏向子(波長板)、狭帯域バンドパスフィルタ等としての機能を発揮させることができる。

【0032】また、レーザ発振器により生成された短波長の紫外線レーザを光伝送路に導入してその光伝送路の先端をAFM(原子間力顯微鏡)のプローブ先端に導出し、前記光伝送路の先端を尖鋭化して前記紫外線レーザの波長以下で微小開口する光透過部を形成したことにより、その光透過部の先方に近接場光を発生させ、この近接場光の領域内に配置された加工対象物の被加工面を前記紫外線レーザの近接場光により微細加工すると共に、前記被加工面での加工寸法をAFMのプローブで測定して近接場光による加工状態をモニタリングすることにより、サブミクロン以下の微細加工を可能にした前述の30 効果の他、加工対象物の被加工面をサブミクロン以下で微細加工する上で最適制御することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係るレーザ加工装置の実施形態を示す概略構成図である。

【図2】AFMのプローブの具体的構造を示すレーザ加工装置の概略構成図である。

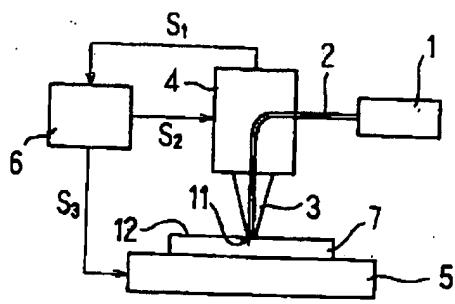
【図3】AFMのプローブ先端に位置する光ファイバの光透過部で発生する近接場光を示す断面図である。

【図4】AFMのプローブ先端に位置する光ファイバの光透過部で発生する近接場光で加工基板をレーザ加工する状態を示す断面図である。

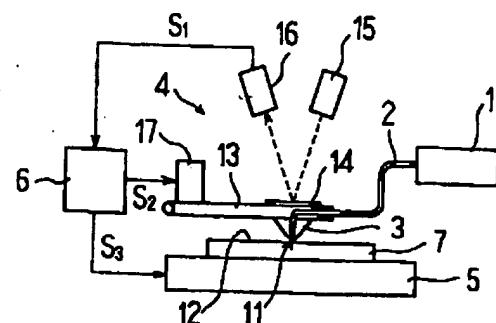
【符号の説明】

- 1 レーザ発振器
- 2 光伝送路(光ファイバ)
- 3 プローブ
- 4 AFM
- 7 加工対象物(加工基板)
- 11 光透過部

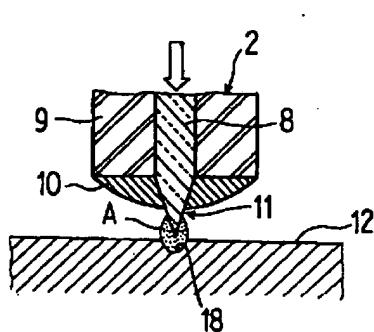
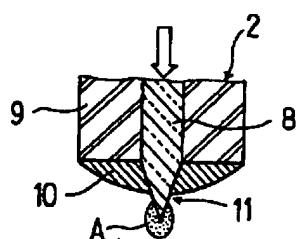
【図1】



【図2】



【図3】



【図4】

フロントページの続き

(51)Int.Cl.
G 0 1 N 13/10
13/16
G 0 2 B 21/00
G 0 3 H 1/04

識別記号

F I
G 0 1 N 13/10
13/16
G 0 2 B 21/00
G 0 3 H 1/04

テーマコード(参考)
F
A

(72)発明者 大割 貫
大阪府三島郡島本町山崎2丁目1番7号
日本非球面レンズ株式会社内

(72)発明者 實野 孝久
大阪府吹田市山田丘2-6 大阪大学レー
ザー核融合研究センター内
F ターム(参考) 2H052 AA00 AD19 AD31 AF03
2K008 DD03 DD12 DD22 EE04 FF27
GG05 HH01 HH21
4E068 CA17 CE04 CE08

Translated from Japanese by
SCIENTIFIC TRANSLATION SERVICES
411 Wyntre Lea Dr.
Bryn Mawr, PA 19010

(19) Japanese Patent Office (JP)
(12) Patent Disclosure Bulletin (A)
(11) Patent Disclosure No.: 2001-239,390 (P2001-239390A)
(43) Disclosure Date: September 4, 2001 (09/04/2001)

(51)	Int. Cl. ⁷ :	Identification Code	FI	Theme Code (references)	
				B23K 26/08	K 2H052
				D 2K008	
	26/00		26/00	G 4E068	
				P	
	B81B 7/02		B81B 7/02		
	G01N 13/10		G01N 13/10	F	
	13/16		13/16	A	
	G02B 21/00		G02B 21/00		
	G03H 1/04		G03H 1/04		

Request for Examination: not yet made

No. of Claims: 8 OL (Total 6 pages)

F term (reference): 2H052 AA00 AD19 AD31 AF03
 2K008 DD03 DD12 DD22 EE04 FF27
 GG05 HH01 HH21
 4E068 CA17 CE04 CE08

(21) Patent Application No.: 2000-51,975 (P2000-51975)

(22) Application Date: February 28, 2000 (02/28/2000)

(71) Applicant: 591225327
Nippon Hikyumen Lens Co., Ltd.
2-1-7 Yamazaki, Shima Hon-cho, Mishima-gun, Osaka-fu

(71) Applicant: 594061724
Takahisa Jitsuno
Laser Nuclear Fusion Research Center, Osaka University
2-6 Yamadagaoka, Suita-shi, Osaka-fu

(72) Inventor: Hiroshi Owari
Nippon Hikyumen Lens Co., Ltd.
2-1-7 Yamazaki, Shima Hon-cho, Mishima-gun, Osaka-fu

(72) Inventor: **Takahisa Jitsuno**
Laser Nuclear Fusion Research Center, Osaka University
2-6 Yamadagaoka, Suita-shi, Osaka-fu

(72) Inventor: Keiu Tokumura
Nippon Hikyumen Lens Co., Ltd.
2-1-7 Yamazaki, Shima Hon-cho, Mishima-gun, Osaka-fu

(74) Agent: 100064584
Shogo Egara, Patent Attorney

(54) [Title of the Invention] **LASER MACHINING APPARATUS AND ITS METHOD
AND AN OPTICAL ELEMENT MACHINED BY USING
SAME**

(57) [Abstract]

[Object] To provide a laser machining apparatus which can easily perform micro-fabrication of objects at the submicron level, corresponding to the increase in the storage capacity of optical discs, in the process of forming circuit lattices [diffraction gratings] of hologram elements which are used in DVD players, etc.

[Means for Accomplishing the Object] Ultraviolet laser radiation with a short wavelength is conducted to an optical fiber 2, the tip of which is introduced into the tip of a probe 3 of an AFM (atomic force microscope) 4. The tip of this optical fiber 2 is sharpened to form an optical transmission part 11 which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation, so that a contact place light is formed in front of this optical transmission part, and the surface 12 of the machined substrate 7 which is placed within the region of this contact place light is micro-fabricated by the contact place light of the said ultraviolet laser; in addition, the machining dimensions on the said surface 12 are measured by the probe 3 of the AFM 4 in order to monitor the state of the machining by the contact place light.

[Scope of the Patent Claims]

[Claim 1] Laser machining method, characterized in that the tip of an optical transmission route which transmits ultraviolet laser radiation with a short wavelength is sharpened to form an optical transmission part which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation; in this way, a contact place light is formed in front of this optical transmission part, and the machined surface of the machined object which is placed in the region of this contact place light is micro-fabricated by the contact place light of the said ultraviolet laser.

[Claim 2] Laser machining method, characterized in that the tip of an optical transmission route which transmits ultraviolet laser radiation with a short wavelength is introduced into the tip of a probe of an AFM (atomic force microscope); the tip of the said optical transmission route is sharpened to form an optical transmission part which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation; in this way, a contact place light is formed in front of this optical transmission part, and the machined surface of the machined object which is placed in the region of this contact place light is micro-fabricated by the contact place light of the said ultraviolet laser; moreover, the machining dimensions on the said surface are measured by the probe of the AFM in order to monitor the state of the machining by the contact place light.

[Claim 3] Laser machining method in accordance with claim 1 or 2, characterized in that the machined surface of the said machined object is a three-dimensional surface.

[Claim 4] Laser machining apparatus, characterized in that it is provided with a laser oscillator which produces a short-wavelength ultraviolet laser and an optical transmission route which transmits the short-wavelength ultraviolet laser which is outputted from this laser oscillator, formed by sharpening the tip of the optical transmission route which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation; a contact place light is formed in front of this optical transmission part, and the machined surface of the machined object which is placed in the region of this contact place light is micro-fabricated by the contact place light of the said ultraviolet laser.

[Claim 5] Laser machining apparatus, characterized in that it is provided with a laser oscillator which produces a short-wavelength ultraviolet laser, an optical transmission route which transmits the short-wavelength ultraviolet laser which is outputted from this laser oscillator, formed by sharpening the tip of the optical transmission route which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation, and an AFM (atomic force microscope) which has a probe into which the tip of this optical transmission route is introduced; a contact place light is formed in front of this optical transmission part, and the machined surface of the machined object which is placed in the region of this contact place light is micro-fabricated by the contact place light of the said ultraviolet laser; moreover, the machining dimensions on the said surface are measured by the probe of the AFM in order to monitor the state of the machining by the contact place light.

[Claim 6] Laser machining apparatus in accordance with claim 4 or 5, characterized in that it is provided with at least an XY table on which the said machined object is positioned in such a way that the contact place light of the said ultraviolet laser can scan with respect to the machined surface of the machined object.

[Claim 7] Laser machining apparatus in accordance with any of the claims 4 through 6, characterized in that the machined surface of the said machined object is three-dimensional.

[Claim 8] Optical element, characterized in that it is produced by a laser machining apparatus or method in accordance with any of the claims 1 through 7 and which has a micro-fabricated pattern at the submicron level.

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of Industrial Application] The present invention pertains to a laser machining apparatus and its method and an optical element machined by using it. For example, it pertains to a laser machining apparatus and method for fabricating various kinds of optical elements, including binary optics, including hologram elements, Fresnel lenses, etc., used in diffraction gratings for detecting tracking errors in DVD players.

[0002]

[Prior Art] In recent years, there has been a trend for the storage capacities of optical discs used in DVD players to increase, and the resolutions of the optical pick-ups which read and write the information on these optical discs are being improved. On the other hand, hologram elements which use diffraction gratings are used for detecting tracking errors of the optical pick-ups with respect to the optical discs; however, with the increased storage capacities of optical discs, it is necessary to make the pitches of the diffraction gratings in the hologram elements narrower. In order to fabricate these hologram element diffraction gratings, general methods for making their surface forms, using the lithography technology, have been employed; this technology was adapted to form the periodic concave/convex structure on the surface of the machined substrates.

[0003]

[Problems to be Solved by the Invention] At present, however, in surface machining by lithography, which has been employed as a general method for forming the periodic concave/convex structure on the surface of the machined substrates, in order to fabricate the diffraction gratings of hologram elements, the mass productivity of fabricating diffraction gratings of hologram elements is poor, and it is difficult to perform micro-fabrication in the submicron range (e.g., 200 μm or smaller) even when short-wavelength light sources are used.

[0004] Therefore, the purpose of the present invention is to provide a laser machining apparatus and method that are able to micro-fabricate machined objects easily in the submicron range in order to respond to the increased storage capacities of optical discs and to increase productivity when diffraction gratings of hologram elements, which are used in DVD players, etc., are produced.

[0005]

[Means for Solving the Problems] As a technological means for accomplishing this purpose, the method of the present invention is characterized in that the tip of an optical transmission route which transmits ultraviolet laser radiation with a short wavelength is sharpened to form an optical transmission part which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation; in this way, a contact place light is formed in front of this optical transmission part, and the machined surface of the machined object which is placed in the region of this contact place light is micro-fabricated by the contact place light of the said ultraviolet laser (claim 1). The apparatus of the present invention is characterized in that it is provided with a laser oscillator which produces a

short-wavelength ultraviolet laser and an optical transmission route which transmits the short-wavelength ultraviolet laser which is outputted from this laser oscillator, formed by sharpening the tip of the optical transmission route which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation; a contact place light is formed in front of this optical transmission part, and the machined surface of the machined object which is placed in the region of this contact place light is micro-fabricated by the contact place light of the said ultraviolet laser (claim 4).

[0006] In the present invention, a contact place light is produced in front of the optical transmission part by sharpening the tip of an optical transmission route which transmits short-wavelength ultraviolet laser radiation to form the optical transmission part which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation. The power of this contact place light is small, but the power density per unit area is high, and since the optical transmission part on the tip of the optical transmission route is smaller than the wavelength of the ultraviolet laser radiation, the machined surface of the machined object can be micro-fabricated at the submicron level by the contact place light of this ultraviolet laser radiation if the contact place light is thrown onto the machined surface.

[0007] Furthermore, the method of the present invention is characterized in that the tip of an optical transmission route which transmits ultraviolet laser radiation with a short wavelength is introduced into the tip of a probe of an AFM (atomic force microscope); the tip of the said optical transmission route is sharpened to form an optical transmission part which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation; in this way, a contact place light is formed in front of this optical transmission part, and the machined surface of the machined object which is placed in the region of this contact place light is micro-fabricated by the contact place light of the said ultraviolet laser; moreover, the machining dimensions on the said surface are measured by the probe of the AFM in order to monitor the state of the machining by the contact place light (claim 2). The apparatus of the present invention is characterized in that it is provided with a laser oscillator which produces a short-wavelength ultraviolet laser, an optical transmission route which transmits the short-wavelength ultraviolet laser which is outputted from this laser oscillator, formed by sharpening the tip of the optical transmission route which has a very small opening smaller than the wavelength of the said ultraviolet radiation, and an AFM (atomic force microscope) which has a probe into which the tip of this optical transmission route is introduced; a contact place light is formed in front of this optical transmission part, and the machined surface of the machined object which is placed in the region of this contact place light is micro-fabricated by the contact place light of the said ultraviolet laser; moreover, the machining dimensions on the said surface are measured by the probe of the AFM in order to monitor the state of the machining by the contact place light (claim 5).

[0008] When micro-fabricating is performed with an ultraviolet laser by means of this contact place light, it is desirable to measure the machining dimensions on the machined surface obtained by the contact place light of the ultraviolet laser radiation by means of an AFM probe in order to monitor the state of the machining by the contact place light. That is, the machining dimensions can be calculated from the differences in the outputs before and after the machining obtained by the AFM probe. The optimum micro-fabrication can be easily performed while the state of the machining is monitored on this basis.

[0009] Furthermore, it is desirable to furnish the said apparatus of the present invention with at least an XY table on which the said machined object is positioned in such a way that the contact place light of the said ultraviolet laser can scan with respect to the machined surface of the machined object (claim 6). In addition, the present invention can be applied to machined objects

with three-dimensional surfaces, such as spherical surfaces (claims 3, 7). Furthermore, optical elements which have micro-fabricated patterns at the submicron level can be obtained by the laser machining apparatus or method of the present invention (claim 8).

[0010]

[Exemplary Embodiment of the Invention] An exemplary embodiment of the present invention will be explained in detail below. In this exemplary embodiment, the case of fabricating a diffraction grating by forming a periodic concave/convex structure on the surface of a machined substrate, the machined object, by laser machining will be explained; this fabrication is performed in the course of fabricating a hologram element using the diffraction grating to detect tracking errors of an optical pick-up with respect to optical discs used in a DVD player. Furthermore, the present invention can also be applied to machined objects with three-dimensional surfaces, such as spherical surfaces. In this case, if necessary, a Z table which moves the machined object in the Z direction can also be provided, in addition to the XY table described below, or a device for raising and lowering the AFM probe can be provided.

[0011] Figure 1 shows a sketch of the make-up of the laser machining apparatus, and Figure 2 shows an example of the specific structure of the AFM probe in this make-up sketch of Figure 1. The laser machining apparatus of the exemplary embodiment shown in these figures is provided with a laser oscillator 1, which produces a short-wavelength ultraviolet laser light; an optical fiber 2 (e.g., a glass fiber), which is the optical transmission route optically connected to the output of this laser oscillator 1, and the tip of this optical fiber 2 is introduced to the probe 3 of an AMF (atomic force microscope) 4, and a probe control signal S_2 is outputted to the driving means of the probe 3 based on the detection signal S_1 from the probe position detection means of the AFM 4. Furthermore, it is provided with a controller 6 which outputs a table control signal S_3 to the driving means of the XY table 5 based on the XY coordinate data of the probe 3.

[0012] The machined substrate 7 is made of a resin, metal, etc.; for example, if a metal substrate is used as the machined object, an etching gas can also be introduced. Moreover, this machined substrate 7 may also be a mold for producing the diffraction grating with a micro-fabricated pattern on the submicron level, as well as this diffraction grating itself. In the case of the mold, diffraction gratings with a micro-fabricated pattern on the submicron level can be mass-produced by means of this mold. The machined substrate 7 is placed in such a way that its surface 12 (the machined surface) is close to the tip of the probe 3 of the AFM 4.

[0013] This machined substrate 7 is positioned, for example, on the XY table 5, and this XY table 5 is driven in the X and Y directions via a piezo element (pressure-electric element) of a driving means, based on table signals S_3 from the controller 6. In this way, the said machined substrate 7 can be moved in the X and Y directions by very small distances (for example, about 100 μm). Furthermore, if the said XY table 5 is mounted on another XY table (not shown), in order to move this machined substrate 7 further in the X and Y directions, this machined substrate 7 can be moved in the X and Y directions by distances on the micron order.

[0014] The said laser oscillator 1 produces an ultraviolet laser light with a short wavelength, e.g., 110-266 nm; suitable ultraviolet lasers for this use are, e.g., an ArF excimer laser with a wavelength of 193 nm, a fluorine laser with a wavelength of 158 nm, a YAG laser (high-frequency light) with a wavelength in the range of 210-266 nm. Other lasers, such as hydrogen lasers, can also be used.

[0015] The optical fiber 2 which extends from this laser oscillator 1 is a two-part one with different refractive indices, as shown in Figure 3. That is, it is formed from a core 8 in the central part and a cladding 9 placed around the core 8; its tip has a structure which is introduced into the tip of the said probe 3 (see Figures 1 and 2). The tip of this optical fiber 2 is sharpened; for example, it has a shape in which the tip of the core 8, which protrudes from the cladding 9 end surface, is sharpened conically and a metal film 10 is coated on this cladding 9 end surface by deposition, etc. In this way, a smaller optical transmission part 11 (e.g., 100 nm or smaller) than the wavelength of the said ultraviolet laser light (e.g., 193 nm) is formed in the conical core 8.

[0016] Thus, the tip of the optical fiber 2 is sharpened and the optical transmission part, with a very fine opening, is smaller than the wavelength of the ultraviolet laser light; therefore, a contact place light A (evanescent light) is formed in front of the optical transmission part 11. The size of the region of this contact place light A is proportional to the size of this optical transmission part 11, and this size becomes the minimum machining width during the laser machining.

[0017] Furthermore, in this exemplary embodiment, in order to produce the contact place light A at the tip of the optical fiber 2, an optical transmission part 11 is formed which has a shape in which the tip of the core 8 is sharpened conically, but it is not limited to this shape; any shape may be used as long as the tip of the optical fiber 2 is sharpened to make a very fine opening smaller than the wavelength of the ultraviolet laser light.

[0018] On the other hand, the AFM 4 is a device which is able to detect the displacements of the probe 3, which are produced by the forces (inter-atomic forces) acting between the surface 12 of the machined substrate 7 and the tip of the probe 3, on the nanometer order. The probe 3 is formed on the tip of a cantilever 13 which is easily bent by very weak forces, and it has an optical system, a probe position detecting means, which measures the displacements of the probe 3 (see Figure 2). This optical system consists, for example, of a detection light source 15 and a light detector 16 which are fixed to specific positions with respect to a reflecting mirror 14, placed on the back of the said cantilever 13; the light emitted from the detection light source 15 is reflected by the reflecting mirror 14, this reflected light is detected by the light detector 16, and this detection signal S_1 is transmitted to the controller 6.

[0019] Furthermore, a piezo element (pressure-electric element) 17, which is a probe driving means, is placed adjacent to the support part of this cantilever 13; the cantilever 13 bends due to the piezo element 17 being driven based on the probe control signal S_2 from the controller 6, and the probe 3 on the tip of the cantilever 13 is moved towards or away from the surface of the machined substrate 7 by this bending. If the voltage applied to the said piezo element 17 is raised, the probe 3 approaches the surface of the machined substrate 7, and if the voltage applied to the piezo element 17 is reduced, the probe 3 moves away from the surface of the machined substrate 7.

[0020] In this AMF 4, changes in the minute forces (inter-atomic forces) acting between the atoms of the tip of the probe 3 and the surface of the machined substrate 7 are detected as the displacement (bending angle) of the cantilever 13, while the probe 3 on the cantilever 13 is moved toward or away from the surface of the machined substrate 7 by the rise or fall in the voltage applied to the piezo element 17. That is, the changes in these inter-atomic forces are detected by the light detector 16 as changes in the reflection angle of the laser light which is emitted from the detection light source 15 and shines on the reflecting mirror 14 on the back of the probe 3.

[0021] Based on the detection signal S_1 , the voltage applied to the piezo element 17 is controlled by the controller 6 and the distance between the tip of the probe 3 and the surface of the machined

substrate 7 is adjusted so that the distance between the tip of the probe 3 and the surface of the machined substrate 7 (e.g., several nm) is kept constant. Therefore, if there are concave and convex places on the surface of the machined substrate 7, the position of the tip of the probe 3 can be adjusted, when the probe 3 is made to scan the surface of the machined substrate 7, by making it follow the uneven shape of the surface of the machined substrate 7 so that its distance from this surface is constant.

[0022] The control of the laser machining apparatus of this exemplary embodiment is performed by the method outlined below. First, as mentioned below, the probe 3, located on the tip of the cantilever 13 of the AFM 4, is positioned by inter-atomic forces so that the distance between the surfaces of the tip of the probe 3 and the machined substrate 7 (e.g., several nm) is kept constant.

[0023] On the other hand, the short-wavelength ultraviolet laser radiation outputted from the laser oscillator 1 is conducted through the optical fiber 2 and introduced to the AFM 4 and then conducted to an optical transmission part 11 which is formed on the tip of an optical fiber 2, placed on the tip of the probe 3. As described above, this optical transmission part 11 is formed as a conical core 8 through which the ultraviolet laser radiation passes, and since it is smaller than the wavelength of the ultraviolet laser radiation, a contact place light A is formed in front of this conical core 8.

[0024] For example, if an excimer laser made of ArF, with a short wavelength of 193 nm, is used as the ultraviolet laser, a very small opening, for example, smaller than 100 nm, smaller than the wavelength of the ultraviolet laser, is formed in the optical transmission part 11 which forms the conical core 8; therefore, the surface of the machined substrate 7 can be micro-fabricated in a submicron region smaller than 200 μ m, e.g., on the nanometer order, by the contact place light A produced by this ultraviolet laser radiation. For example, a concave part 18 which has a size smaller than 100 nm can be formed (see Figure 4). The size of this concave part 18, i.e., the machined width of the concave part 18, is determined by the size of the contact place light A.

[0025] When a concave part 18 is formed by the contact place light A produced by the ultraviolet laser radiation on the surface of the machined substrate in the manner described above, the distance between the tip of the probe 3 and the surface of the machined substrate 7, i.e., the bottom of the concave part 18, becomes larger; therefore, the cantilever 13 is bent by the passing of current (a rise in the applied voltage) to the piezo element 17, to a position such that the distance between the tip of the probe 3 and the bottom of the concave part 18 (e.g., several nm) becomes constant, and the probe 3 is therefore brought closer.

[0026] Furthermore, when the probe 3 is brought closer, to a position such that the distance between the tip of the probe 3 and the bottom of the concave part 18 becomes constant, the depth of the machining of the concave part 18 is obtained by calculation by the controller 6, based on the positional displacement between the reflected light in the optical system at this position (after the machining) and the reflected light in the initial position (before the machining). By measuring the depth of the machining of the concave part 18 by the amount of movement of the probe 3 of the AFM 4, in this manner, it is possible to micro-fabricate a concave part 18 which has the optimum machining depth by monitoring the amount of this machining with the AFM 4.

[0027] When the concave part 18 is micro-fabricated in the manner described above, the machined substrate 7 is moved in a minute amount in the desired XY directions through the XY table 5 by passing current to the piezo elements (not shown) of the XY table 5, the contact place light A of the ultraviolet laser radiation which is located on the probe 3 tip can be scanned over the machined

substrate 7 and a concave groove with the desired shape and length can be formed; finally, a periodic concave/convex structure can be micro-fabricated on the surface of the machined substrate 7. A diffraction grating can be made by micro-fabricating this kind of machined substrate 7 in a submicron region smaller than 200 μm .

[0028] If a diffraction grating can be made in a submicron region as described above, it can be made to exhibit an effect of preventing reflection or the functions of a deflector (wavelength plate), narrow-band band pass filter, etc.

[0029] Furthermore, in the micro-fabrication performed by the contact place light A of the ultraviolet laser radiation described above, the case in which a concave part 18 is formed was explained, but it is also possible to form a convex part by introducing a gas containing a metal atom by using a CVD technology, for example, and accumulating the metal on the surface of the machined substrate by means of the contact place light of the ultraviolet laser radiation. In this case, also, the smallest machining width of this convex part depends on the size of the contact place light, and the height of the convex part can be controlled to the optimum value by monitoring it with the AFM probe.

[0030] In addition, in the exemplary embodiment described above, the case of producing a hologram element using a diffraction grating for detecting the tracking errors of an optical pick-up with respect to optical discs used in DVD players was explained. However, the present invention is not limited to this application; it can also be applied to the case in which a machined substrate is laser-machined in order to form circuit patterns in a CVD apparatus in order to increase the degree of integration of the other optical or semiconductor elements.

[0031]

[Effects of the Invention] By means of the present invention, it has become possible to micro-fabricate the machined surface of a machined object in a submicron region smaller than 200 μm by conducting a short-wavelength ultraviolet laser radiation produced by a laser oscillator into an optical transmission route and sharpening the tip of this optical transmission route to form an optical transmission part which has a very small opening, smaller than the wavelength of the said ultraviolet laser radiation, thus producing a contact place light in front of this optical transmission part, and then micro-fabricating the machined surface of the machined object, which is placed in the region of this contact place light, by means of the said contact place light of the ultraviolet laser radiation. For example, one can easily cope with the increased memory capacities in optical media, such as DVD devices, and the increased degree of integration of semiconductor technologies obtained by CVD, etc. Furthermore, if it becomes possible to micro-fabricate diffraction gratings which are used in DVD players, etc., on the said submicron level, one can make use of their effect of preventing reflection or the functions of a deflector (wavelength plate), narrow-band band pass filter, etc.

[0032] In addition, the machined surface of a machined object can be micro-fabricated by conducting a short-wavelength ultraviolet laser radiation produced by a laser oscillator into an optical transmission route and introducing the tip of this optical transmission route into the probe tip of an AFM (atomic force microscope), sharpening the tip of this optical transmission route to form an optical transmission part which has a very small opening, smaller than the wavelength of the said ultraviolet laser radiation, thus producing a contact place light in front of this optical transmission part, after which the micro-fabricating is performed by this contact place light of the said ultraviolet laser radiation. In addition, by monitoring the state of the machining by means of the contact place

light by measuring the machining dimensions on the said machined surface with the probe of the AFM, the said effect of making possible the micro-machining at the submicron level in this manner can be obtained, and the machining can be controlled in the optimum manner to micro-fabricate the machined surface of the machined object.

[Brief Description of the Drawings]

Figure 1 is a sketch of the make-up of an exemplary embodiment of a laser machining apparatus of the present invention.

Figure 2 is a sketch of the make-up of a laser machining apparatus showing the specific structure of the probe of the AFM.

Figure 3 is a cross-sectional drawing showing the contact place light produced at the optical transmission part of the optical fiber located at the tip of the probe of the AFM.

Figure 4 is a cross-sectional drawing state in which the machined substrate is laser-machined by the contact place light produced at the optical transmission part of the optical fiber located at the tip of the probe of the AFM.

[Explanation of the Symbols]

- 1 Laser oscillator
- 2 Optical transmission route (optical fiber)
- 3 Probe
- 4 AFM
- 7 Machined object (machined substrate)
- 11 Optical transmission part

Figure 1

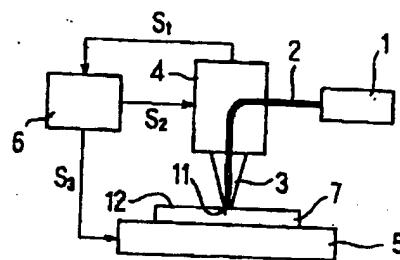


Figure 2

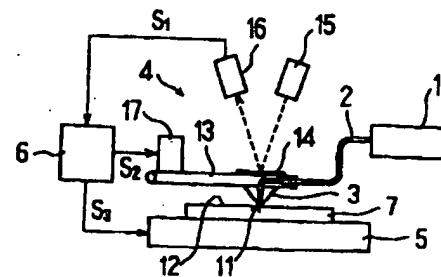


Figure 3

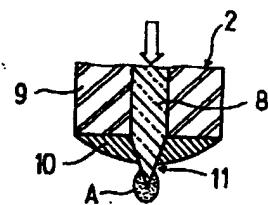


Figure 4

